

自然生草对渭北旱塬苹果园土壤孔隙和水分入渗的影响

李志熙¹ 白岗栓^{2,3*} 邹超煜⁴ 邵发琦⁵

1. 陕西榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000;
2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
4. 吉安市湿地保护中心, 江西 吉安 343000;
5. 安康市农业科学研究院, 陕西 安康 725021)

摘要 为促进渭北旱塬果园土壤水分入渗,提高土壤蓄水保水能力,促进苹果生产,以果园清耕为对照,探讨不同年限的自然生草(繁缕和牛繁缕群落,自然生草持续 12、8 和 4 年)对果园土壤孔隙、土壤保水性能、土壤水分入渗和苹果品质等的影响。结果表明:自然生草对果园 0~40 cm 土层土壤容重和土壤孔隙度无显著影响,但显著提高了 0~40 cm 土层土壤含水量、田间持水量和饱和含水量,极显著提高了土壤水分入渗速率,且自然生草持续的年限越长其影响越大。自然生草提高了苹果产量、果实着色面积、果实硬度、果实可溶性固形物含量和固酸比,但对果实单果质量、果形指数和可滴定酸含量无显著影响。综上,自然生草可改善果园土壤通透性,促进土壤水分入渗,提高果实产量和品质,是改善渭北旱塬果园土壤蓄水保水能力的有效措施。

关键词 自然生草; 苹果; 土壤孔隙; 土壤入渗; 果实品质

中图分类号 S661.1;S152.7

文章编号 1007-4333(2022)05-0146-11

文献标志码 A

Effects of self-sown grass on soil porosity and soil infiltration in apple orchard in Weibei dry plateau

LI Zhixi¹, BAI Gangshuan^{2,3*}, ZOU Chaoyu⁴, SHAO Faqi⁵

1. College of Life Science, Yulin University, Yulin 719000, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;
3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/ Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;
4. Ji'an Wetland Protection Center, Ji'an 343000, China;
5. Institute of Ankang Agricultural Science Research, Ankang 725021, China)

Abstract In order to promote the soil water infiltration, improve the soil water retention capacity, and promote apple production, with clean tillage as control, the effects of self-sown grass of lasted different years (*Stellaria media* and *Malachium aquaticum* community, the self-sown grass lasted 12, 8 and 4 years) on soil porosity, soil water retention, soil infiltration, apple quality and others were systematically investigated in Weibei dry plateau. The results showed that: The self-sown grass had no significant effect on soil bulk density and soil porosity of orchard in 0-40 cm soil layer, but the self-sown grass significantly increased soil moisture, soil field moisture capacity and soil saturation moisture, extremely significant increased soil water infiltration rate. The longer the self-sown grass lasted years, the greater the effects were. The self-sown grass increased the fruit yields, fruit red coefficient, fruit firmness, fruit soluble solids content and the ratio of soluble solids to titratable acid, but had no significant effects on single fruit weight, fruit shape index and fruit titratable acid content. To sum up, the self-sown grass improved soil permeability, promoted soil

收稿日期: 2021-10-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501602);陕西省科技厅重点研发计划项目(2019TSLNY03-03);榆林市科技局产学研项目(2019-88-1)

第一作者: 李志熙,教授,主要从事果树栽培及植物学研究,E-mail:465127823@qq.com

通讯作者: 白岗栓,研究员,主要从事果树栽培及农田生态研究,E-mail:gshb@nwsuaf.edu.cn

infiltration, and increased fruit yield and quality. Therefore, the self-sown grass can be an effective measure to improve soil water storage and water conservation of orchard in Weibei dry plateau.

Keywords self-sown grass; apple; soil porosity; soil infiltration; fruit quality

土壤结构不仅影响土壤养分的供应、水分的保持及渗透和气体的交换等过程,而且控制着土壤有机质的累积与矿化的转化过程^[1]。土壤孔隙是土壤容纳空气和水分的空间,也是植物根系伸展、土壤动物及土壤微生物生长发育及活动的场所,直接影响着土壤的肥力和土壤水分的有效性^[1-2]。通常情况下根据土壤孔隙的当量孔径将土壤孔隙分为非活性孔隙(当量孔径小于0.002 mm)、毛管孔隙(当量孔径在0.002~0.020 mm)和非毛管孔隙(当量孔径大于0.020 mm)^[1-3]。土壤中的非毛管孔隙,即大孔隙与土壤降水入渗、地表径流和土壤肥力密切相关,影响土壤的水分入渗、通气性及蓄水保水能力^[3]。渭北旱塬为雨养农业区,是中国最大的优质苹果(*Malus domestica*)生产基地,土壤水分亏缺是限制苹果优质高产的首要因素^[4]。为了提高果园土壤水分,改善果园立地环境,渭北旱塬果园管理已由传统的果园清耕转向果园生草^[4-6]。果园生草可分为自然生草和人工生草2种模式^[7-8],自然生草往往经过多年的自然淘汰与选择,能够适应当地果园的生态环境,且覆盖期长、覆盖度高和耗水量少,在人工管理的前提下能有效改善果园的生态环境^[9-13];而人工生草往往选用豆科或禾本科植物,生长量较大,存在着与果树争水和争肥的问题^[14-17]。渭北旱塬西部的长武塬区,经过多年的自然选择与淘汰,繁缕(*Stellaria media*)和牛繁缕(*Malachium aquaticum*)已成为当地果园杂草的优势种类及顶级群落^[4],对提高果园土壤水分和土壤有机质、降低果园硝态氮积累、平衡果园土壤养分供给、减少果树生理病害和改善果园小气候等有积极的作用^[4, 18-20]。但有关渭北旱塬自然生草对果园土壤孔隙、土壤保水能力和土壤水分入渗等方面缺乏研究。本研究以果园清耕为对照,探讨持续生长12、8和4年的自然杂草—繁缕和牛繁缕群落对果园土壤孔隙、土壤保水能力和土壤水分入渗等的影响,以期为自然生草提高果园土壤蓄水保水能力提供支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2009—2021年在渭北旱塬西部的中国

科学院长武黄土高原农业生态试验站(35°12' N, 107°40' E)进行,该试验站海拔1 220 m,年均降水量551.7 mm,7—9月降水量约占全年的60%以上,日照时数2 226.5 h,年均气温9.1℃,无霜期171 d。试验园土壤为黑垆土,试验前(2009年3月)耕层(0~20 cm土层)土壤有机质质量分数为9.76 g/kg,速效氮69.75 mg/kg,速效磷42.28 mg/kg,速效钾198.46 mg/kg,pH7.8,土壤容重1.32 g/cm³,土壤萎蔫系数7.62%,田间持水量21.46%。20~60 cm土层土壤容重平均为1.35 g/cm³。果园杂草主要为繁缕和牛繁缕。试验前4—9月果园土壤管理为自然生草,9月—翌年3月为清耕。

1.2 试验材料

供试苹果园面积2.0 hm²,于1996年春季定植,南北行向,株距3.0 m,行距4.0 m,主栽品种为‘红富士’,授粉品种为‘皇家嘎啦’,砧木为新疆野苹果(*Malus sieversii*),处于盛果期。2009年试验前树干直径为7.5 cm左右,树高为380 cm左右,树形为小冠疏层形,冠径为360 cm左右,产量为40 000 kg/hm²左右。试验果园自然生长的杂草主要为繁缕和牛繁缕,生长期长达240 d左右,高度在10.0~15.0 cm,平伏于地表生长,能够快速自我繁殖,且根系多分布于0~10 cm土层,根系生物量较小^[18]。

1.3 试验设计与监测项目

1.3.1 试验设计

试验以果园清耕为对照,监测果园不同自然生草持续年限(12、8和4年)0~60 cm土层的土壤容重、饱和含水量、田间持水量、土壤孔隙度、土壤水分入渗速率、果实产量和果实品质等。试验重复3次,共15个小区,每个小区东西宽40.0 m,南北长48.0 m,每个小区有9行苹果树,每行15株。试验期间不同处理的修剪、施肥、疏花疏果、果实套袋和病虫害防治等管理措施均相同。试验期间不同处理均未施有机肥,均施化肥,化肥种类为尿素、过磷酸钙和硫酸钾^[19-20]。

1.3.1.1 清耕

试验前果园地面管理为半自然生草和半清耕(4—9月为自然生草,9月—翌年3月为清耕)模式。2009年3月下旬采用低矮型旋耕机进行旋耕,旋耕

深度 15 cm, 2009 年 3 月—2021 年 11 月每间隔 2—3 个月旋耕 1 次, 行间和树盘下的杂草均及时锄除, 确保没有杂草滋生。

1.3.1.2 自然生草持续 12 年

试验前果园土壤管理同清耕, 2009 年 3 月下旬旋耕后让其自然生草。自然生草期间出现的灰藜 (*Chenopodium album*)、龙葵 (*Solanum nigrum*)、苘麻 (*Abutilon theophrasti*)、反枝苋 (*Amaranthus retroflexus*) 和虎尾草 (*Chloris virgata*) 等高大杂草及时拔除, 保留繁缕、牛繁缕、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、荠菜 (*Capsella bursa-pastoris*)、鸡肠草 (*Centipeda minima*)、箭叶旋花 (*Convolvulus arvensis*)、马唐 (*Digitaria sanguinalis*) 和马齿苋 (*Portulaca oleracea*) 等低矮草本。自然生草期间杂草的高度低于 30 cm, 2009 年 4 月—2021 年 11 月一直未进行刈割及旋耕。

1.3.1.3 自然生草持续 8 年和 4 年

2009 年 3 月至试验布设前地面管理同清耕, 分别于 2013 年 4 月和 2017 年 4 月至 2021 年 11 月让其自然生草, 即自然生草持续 8 年和 4 年, 地面管理同自然生草持续 12 年。

1.3.2 监测项目

1.3.2.1 土壤容重、土壤孔隙度、土壤含水量、田间持水量和饱和含水量

2021 年苹果花芽分化期 (6 月 15 日), 每个小区采用棋盘法布点, 在树行中部选取 5 个采样点, 以 10 cm 为 1 层, 开挖土壤剖面, 用容积为 100 cm³ 的环刀分别取 0~10、<10~20、<20~30、<30~40、<40~50 和 <50~60 cm 土层的原状土各 6 份, 不同处理不同土层的土壤含水量用烘干法测定, 土壤容重、土壤孔隙度、田间持水量和饱和含水量用环刀法测定。

1.3.2.2 土壤水分入渗速率

2021 年苹果花芽分化期 (6 月 20 日), 每个小区采用棋盘法布点, 在树行中部选取地面平整的 5 个试验点, 用双环法测定土壤水分入渗状况^[21-22], 并计算土壤初始入渗率 (前 3 min 内的土壤入渗速率平均值)、前 30 min 入渗率、稳定入渗率和整个测试期间的入渗率。

1.3.2.3 果实产量及品质

苹果成熟期每个小区随机选择 5 株苹果树, 测定单株果实产量。每个小区随机采收 100 个果实, 用百分之一天平称量单果质量, 用数显游标卡尺测

定果实横径和纵径并计算果形指数 (果实纵径与横径的比值), 用 PR-100 型数显糖度计测定果实可溶性固形物含量, 用 GY-1 型果实硬度计测定果实硬度, 用 NaOH 中和滴定法测定果实可滴定酸含量, 用目测法测定果实着色面积。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 2010 制作图表, 用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析; 若出现差异显著, 则采用 Duncan's 多重比较法进行检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理的土壤容重和土壤孔隙度

不同处理的土壤容重总体上均随土层深度的增加而缓慢增加 (表 1)。与清耕相比, 自然生草持续 12、8 和 4 年 0~10、<10~20、<20~30 和 <30~40 cm 土层土壤容重降低幅度相对较大, <40~50 和 <50~60 cm 土层降低幅度较小, 其中 0~40 cm 土层土壤容重平均值分别较清耕降低了 3.17%、2.41% 和 1.66%, <40~60 cm 土层分别降低了 0.96%、0.59% 和 0.30%, 0~60 cm 土层分别降低了 2.47%、1.87% 和 1.20%, 与清耕未形成显著差异。

不同处理的土壤总孔隙度均随土层深度的增加而缓慢降低。自然生草持续 12、8 和 4 年 0~40 cm 土层平均土壤总孔隙度分别较清耕增加了 3.26%、2.42% 和 1.50%, <40~60 cm 土层分别增加了 1.95%、1.42% 和 0.70%, 0~60 cm 土层分别增加了 2.82%、2.08% 和 1.23%, 与清耕未形成显著差异 (表 2)。

不同处理的土壤毛管孔隙度均随土层深度的增加而缓慢降低。自然生草持续 12、8 和 4 年不同土层的土壤毛管孔隙度均较清耕略有增加, 且自然生草持续的年份越长, 增加的幅度越大。但不同自然生草持续年份的土壤毛管孔隙度均与清耕处于同一水平, 未与清耕形成显著差异 (表 2)。

不同处理的土壤非毛管孔隙度随土层深度的增加无明显变化规律。自然生草持续 12、8 和 4 年不同土层的土壤非毛管孔隙度均较清耕略有增加, 且增加的幅度略高于土壤毛管孔隙度, 但不同自然生草持续年份与清耕之间未形成显著差异 (表 2)。

综上, 自然生草对 0~40 cm 土层的土壤容重和土壤孔隙度的影响相对较大, 对 <40~60 cm 土层的影响相对较小。

表 1 不同处理的土壤容重
Table 1 Soil bulk density of different treatments g/cm³

土层深度/cm Soil depth	清耕 Clean tillage	自然生草持续 4 年 Self-sown grass for 4 years	自然生草持续 8 年 Self-sown grass for 8 years	自然生草持续 12 年 Self-sown grass for 12 years
0~10	1.314±0.142 a	1.296±0.128 a	1.286±0.138 a	1.276±0.134 a
<10~20	1.322±0.138 a	1.298±0.132 a	1.285±0.129 a	1.276±0.131 a
<20~30	1.328±0.126 a	1.304±0.124 a	1.294±0.126 a	1.284±0.123 a
<30~40	1.339±0.132 a	1.318±0.127 a	1.309±0.129 a	1.299±0.128 a
<40~50	1.351±0.128 a	1.346±0.126 a	1.341±0.128 a	1.334±0.127 a
<50~60	1.359±0.124 a	1.356±0.122 a	1.352±0.122 a	1.349±0.122 a
平均值 Average	1.336±0.134 a	1.320±0.127 a	1.311±0.126 a	1.303±0.129 a

注：表中同行相同小写字母表示不同处理间无显著差异(P<0.05)。表 2 同。

Note: Same lowercase letters in the same line indicate no significant difference at the 0.05 level between different treatments.
The same as Table 2.

表 2 不同处理的土壤孔隙度
Table 2 Soil porosity of different treatments %

测定项目 Measuring item	土层深度/cm Soil depth	清耕 Clean tillage	自然生草持续 4 年 Self-sown grass for 4 years	自然生草持续 8 年 Self-sown grass for 8 years	自然生草持续 12 年 Self-sown grass for 12 years
土壤总孔隙度 Soil total porosity	0~10	50.54±2.26 a	51.12±2.31 a	51.58±2.16 a	51.97±2.24 a
	<10~20	50.24±1.87 a	51.04±1.79 a	51.49±1.84 a	51.97±1.81 a
	<20~30	49.89±1.68 a	50.79±1.72 a	51.23±1.69 a	51.67±1.72 a
	<30~40	49.54±1.57 a	50.24±1.51 a	50.72±1.53 a	51.12±1.50 a
	<40~50	48.86±1.52 a	49.22±1.49 a	49.65±1.46 a	49.94±1.48 a
	<50~60	48.39±1.50 a	48.72±1.48 a	48.98±1.45 a	49.21±1.46a
	平均值	49.58±1.98 a	50.19±1.87 a	50.61±1.84 a	50.98±1.84 a
土壤毛管孔隙度 Soil capillary porosity	0~10	24.56±1.06 a	24.89±1.04 a	25.12±1.04 a	25.36±1.02 a
	<10~20	24.32±0.78 a	24.68±0.76 a	24.92±0.76 a	25.18±0.75 a
	<20~30	23.82±0.75 a	24.18±0.73 a	24.37±0.73 a	24.56±0.72 a
	<30~40	23.46±0.69 a	23.68±0.68 a	23.86±0.67 a	23.99±0.67 a
	<40~50	22.88±0.68 a	23.01±0.67 a	23.16±0.84 a	23.29±0.84 a
	<50~60	22.45±0.65 a	22.58±0.65 a	22.66±0.64 a	22.76±0.63 a
	平均值	23.58±0.75 a	23.84±0.73 a	24.02±0.72 a	24.19±0.72 a
土壤非毛管孔隙度 Soil air-filled porosity	0~10	25.98±1.21 a	26.23±1.19 a	26.46±1.19 a	26.61±1.18 a
	<10~20	25.92±1.18 a	26.36±1.14 a	26.57±1.14 a	26.79±1.12 a
	<20~30	26.07±0.96 a	26.61±0.92 a	26.86±0.92 a	27.11±0.92 a
	<30~40	26.08±0.88 a	26.56±0.86 a	26.86±0.84 a	27.13±0.84 a
	<40~50	25.98±0.83 a	26.21±0.83 a	26.49±0.82 a	26.65±0.82 a
	<50~60	25.94±0.83 a	26.14±0.82 a	26.32±0.82 a	26.46±0.81 a
	平均值	26.00±1.18 a	26.35±1.15 a	26.59±1.13 a	26.79±1.13 a

2.2 不同处理的土壤保水性能

自然生草持续 12、8 和 4 年 0~60 cm 土层平均土壤含水量分别较清耕提高了 9.31%、7.49% 和 4.75%，其中自然生草持续 12 年 0~30 cm 土层极显著 ($P<0.01$) 高于清耕，30~50 cm 土层显著 ($P<0.05$) 高于清耕；自然生草持续 8 年 0~10 cm 土层极显著 ($P<0.01$) 高于清耕，10~50 cm 土层显著 ($P<0.05$) 高于清耕；自然生草持续 4 年 0~10 cm 和 20~40 cm 土层显著 ($P<0.05$) 高于清耕(表 3)。自然生草持续的年限越长，对土壤水分的影响越大，且对上层土壤水分的影响大于下层

土壤。

自然生草持续 12、8 和 4 年 0~60 cm 土层平均土壤田间持水量分别较清耕提高了 4.42%、3.29% 和 2.01%，自然生草持续 12 年 0~30 cm 土层显著 ($P<0.05$) 高于清耕，自然生草持续 8 年 10~20 cm 土层显著 ($P<0.05$) 高于清耕。

自然生草持续 12、8 和 4 年 0~60 cm 土层平均土壤饱和含水量分别较清耕增加了 4.53%、3.41% 和 2.15%，自然生草持续 12 年 0~40 cm 土层显著 ($P<0.05$) 高于清耕，自然生草持续 8 年 20~30 cm 土层显著 ($P<0.05$) 高于清耕(表 3)。

表 3 不同处理的土壤持水能力

Table 3 Soil moisture holding capacity of different treatments

%

测定项目 Measuring item	土层深度/cm Soil depth	清耕 Clean tillage	自然生草持续 4 年 Self-sown grass for 4 years	自然生草持续 8 年 Self-sown grass for 8 years	自然生草持续 12 年 Self-sown grass for 12 years
土壤含水量 Soil moisture	0~10	15.67±1.28 cB	16.82±1.32 bAB	17.46±1.26 abA	17.79±1.24 aA
	<10~20	15.34±1.36 cB	16.04±1.32 bcAB	16.64±1.24 abAB	16.98±1.26 aA
	<20~30	14.98±1.19 cB	15.74±1.20 bAB	16.18±1.19 abAB	16.56±1.21 aA
	<30~40	14.98±1.17 bA	15.76±1.22 aA	16.13±1.21 aA	16.41±1.18 aA
	<40~50	15.32±1.12 bA	15.95±1.12 abA	16.24±1.09 aA	16.45±1.12 aA
	<50~60	15.86±1.05 aA	16.24±1.04 aA	16.42±1.06 aA	16.54±1.04 aA
	平均值	15.36±1.24 bA	16.09±1.24 abA	16.51±1.20 aA	16.79±1.18 aA
田间持水量 Field moisture capacity	0~10	21.31±1.54 bA	21.89±1.56 abA	22.24±1.58 abA	22.56±1.52 aA
	<10~20	21.04±1.38 bA	21.68±1.32 abA	22.12±1.26 aA	22.42±1.22 aA
	<20~30	20.46±1.25 bA	21.15±1.22 abA	21.48±1.22 abA	21.81±1.20 aA
	<30~40	20.14±1.24 aA	20.48±1.25 aA	20.78±1.22 aA	21.05±1.22 aA
	<40~50	19.76±1.05 aA	19.91±1.04 aA	20.01±1.02 aA	20.12±1.02 aA
	<50~60	19.54±0.94 aA	19.61±0.88 aA	19.68±0.92 aA	19.74±0.90 aA
	平均值	20.38±1.23 aA	20.79±1.21 aA	21.05±1.21 aA	21.28±1.20 aA
土壤饱和含水量 Soil saturation moisture content	0~10	43.85±2.24 bA	44.96±2.32 abA	45.67±2.20 abA	46.23±2.34 aA
	<10~20	43.46±2.18 bA	44.84±2.06 abA	45.58±2.06 abA	46.18±2.04 aA
	<20~30	42.85±2.02 bA	44.43±1.98 abA	45.15±1.94 aA	45.88±1.94 aA
	<30~40	42.53±1.98 bA	43.45±1.96 abA	44.17±1.96 abA	44.86±1.94 aA
	<40~50	42.20±1.84 aA	42.55±1.84 aA	42.74±1.81 aA	42.94±1.80 aA
	<50~60	42.12±1.64 aA	42.31±1.58 aA	42.46±1.56 aA	42.58±1.56 aA
	平均值	42.84±2.05 aA	43.76±1.97 aA	44.30±1.96 aA	44.78±1.95 aA

注：表中同行不同小写和大写字母分别表示不同处理间存在显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 差异。下同。

Note: Different lowercase letters and capital letters in the same line indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 levels between different treatments, respectively. The same below.

2.3 不同处理的土壤水分入渗特征

从试验开始至前 30 min, 不同处理的土壤水分

入渗速率均表现为快速下降, 随后进入缓慢降低阶段, 至 160 min 以后, 基本处于稳定状态(图 1)。

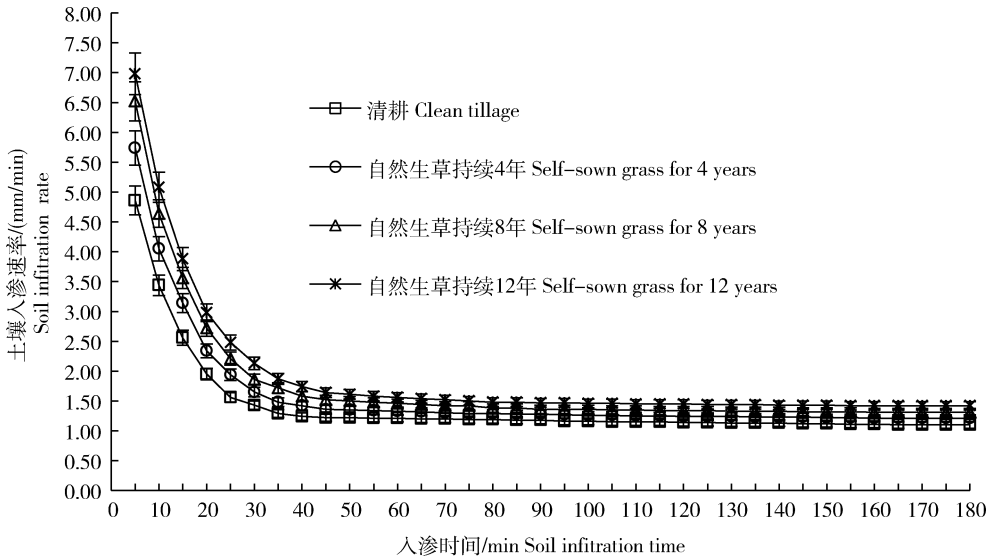


图 1 不同处理的土壤入渗速率

Fig. 1 Soil infiltration rate of different treatments

自然生草持续 12、8 和 4 年的初始入渗率分别较清耕提高了 44.66%、35.59% 和 19.93%，前 30 min 土壤入渗率分别提高了 49.05%、36.50% 和 19.39%，整个测试期间的土壤入渗率分别提高了 34.75%、24.11% 和 12.77%，土壤水分稳定入渗率分别提高了 29.09%、19.09% 和 10.00%，均极显著($P < 0.01$)高于清耕；自然生草持续 12 和 8 年的初始入渗率、前 30 min 土壤入渗率和整个

测试期间的土壤入渗率均极显著($P < 0.01$)高于自然生草持续 4 年，自然生草持续 12 年显著($P < 0.05$)高于自然生草持续 8 年；自然生草持续 12 年的土壤水分稳定入渗率极显著($P < 0.01$)高于自然生草持续 4 年，显著($P < 0.05$)高于自然生草持续 8 年，自然生草持续 8 年的土壤水分稳定入渗率显著($P < 0.05$)高于自然生草持续 4 年(表 4)。

表 4 不同处理不同入渗阶段的土壤入渗速率

Table 4 Soil infiltration rate in different infiltration stages of different treatments mm/min

入渗阶段 Infiltration stages	清耕 Clean tillage	自然生草持续 4 年 Self-sown grass for 4 years	自然生草持续 8 年 Self-sown grass for 8 years	自然生草持续 12 年 Self-sown grass for 12 years
初始入渗率 Initial infiltration rate	5.62±0.34 dC	6.74±0.32 cB	7.62±0.32 bA	8.13±0.32 aA
前 30 min 入渗率 Infiltration rate in the first 30 min	2.63±0.24 dC	3.14±0.22 cB	3.59±0.22 bA	3.92±0.21 aA
测试期间的入渗率 Infiltration rate during the testing	1.41±0.12 dC	1.59±0.12 cB	1.75±0.14 bA	1.90±0.14 aA
稳定入渗率 Stable infiltration rate	1.10±0.02 dC	1.21±0.02 cB	1.31±0.03 bAB	1.42±0.03 aA

2.4 不同处理的苹果产量及品质

自然生草持续 12、8 和 4 年的苹果产量分别较清耕提高了 24.28%、16.84% 和 7.44%，自然生草

持续 12 和 8 年极显著 ($P < 0.01$) 高于清耕，自然生草持续 4 年显著 ($P < 0.05$) 高于清耕。自然生草持续的年限越长，果实产量越高(表 5)。

表 5 不同处理的果实产量及品质

Table 5 Fruit yield and fruit quality of different treatments

测定项目 Measuring item	清耕 Clean tillage	自然生草持续 4 年 Self-sown grass for 4 years	自然生草持续 8 年 Self-sown grass for 8 years	自然生草持续 12 年 Self-sown grass for 12 years
果实产量/(kg/株) Fruit yield	41.56±2.45 dC	44.65±3.12 cBC	48.56±3.43 bAB	51.65±3.54 aA
单果质量/g Single fruit weight	218.67±12.14 aA	221.87±12.46 aA	223.62±12.34 aA	222.84±12.68 aA
果形指数 Fruit shape index	0.88±0.03 aA	0.88±0.04 aA	0.89±0.03 aA	0.89±0.03 aA
着色面积/% Red coefficient	91.21±2.14 bA	96.72±1.02 aA	97.81±0.78 aA	98.82±0.64 aA
硬度/(kg/cm ²) Fruit firmness	8.51±0.34 bB	9.22±0.39 aAB	9.42±0.42 aA	9.56±0.45 aA
可溶性固形物质量分数/% Soluble solid mass fraction	11.48±1.14 bB	12.56±1.16 aAB	12.68±1.18 aA	12.75±1.21 aA
可滴定酸质量分数/% Titratable acid mass fraction	0.38±0.05 aA	0.38±0.04 aA	0.37±0.03 aA	0.37±0.032 aA
固酸比 Ratio of soluble solids to titratable acid	30.21±2.26 bB	33.05±2.43 aAB	34.27±2.46 aA	34.46±2.47 aA

不同处理的单果质量和果形指数基本一致，但自然生草的果实着色面积均显著 ($P < 0.05$) 高于清耕。自然生草持续 12、8 和 4 年的果实硬度分别较清耕提高了 11.16%、10.69% 和 7.29%，可溶性固形物含量分别提高了 11.06%、10.45% 和 6.79%，果实固酸比分别提高了 14.07%、13.44% 和 9.40%，以上测定项目自然生草持续 12 和 8 年的均极显著 ($P < 0.01$) 高于清耕，自然生草持续 4 年的显著 ($P < 0.05$) 高于清耕。不同处理的果实可滴定酸含量基本一致，不同处理之间无显著差异。自然生草持续的年限越长，对果实品质的影响越强烈(表 5)。

3 讨论

土壤容重通常受土壤质地、土壤结构、土壤有机质、耕作、灌溉及施肥等农业措施的影响^[23]。土壤孔隙是土壤结构的重要组成部分，其数量及大小分布直接决定着土壤的透气性、持水保水性以及作物根系在土壤空间的伸展，间接影响土壤肥力和作物产量^[24-29]。在较大空间尺度上，土壤容重和土壤孔隙主要受母岩、气候、地质历史和地形等的影响，在

较小尺度上主要受植被分布、微立地环境及农事耕作的影响^[30]。果园自然生草后，首先是杂草根系在土壤中生长和穿插，分割了土壤，使土壤产生裂隙，增加了土壤孔隙；其次是根系死亡、腐烂后被微生物分解形成根孔，提高了土壤中的非毛管孔隙；第三是根系腐烂后可转换为土壤有机质，土壤有机质可提高土壤水稳性团聚体，增加土壤孔隙，特别是增加土壤毛管孔隙，改善土壤结构；第四是自然生草后改善了果园的立地环境，有利于土壤动物如蚯蚓 (*Lumbricus* spp.) 和蚂蚁 (Formicidae) 等的生存，而这些土壤动物在生长过程往往会在土壤中形成较大的孔隙，即非毛管孔隙^[7-20, 24, 31-33]；第五是植被能增加土壤中的粉黏粒含量，提高土壤的总孔隙度和毛管孔隙度^[34]；第六是本试验果园的自然杂草主要为繁缕和牛繁缕，平伏于地面生长，不需耕种和刈割，减少了机械对土壤的碾压，促进土壤孔隙均匀分布及土壤非毛管孔隙的形成^[35]，因而渭北旱塬果园自然生草后土壤容重有降低的趋势，土壤总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度有增加的趋势。虽然自然生草能提高土壤有机质^[6-8, 18]，改善土壤结构等，但

由于试验园自然生草的种类主要为繁缕和牛繁缕,生物量较小,产生的枯枝落叶少^[18-19],而土壤容重与土壤孔隙的变化是一个缓慢的变化过程,因而不同生草年限的土壤容重和土壤孔隙相互之间及与清耕之间均未形成显著差异。

降雨入渗是降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节,土壤水分入渗过程和入渗能力决定了降雨进程中分配到土壤中的储水量和地表的径流量^[36-37]。在干旱和半干旱地区,农业发展的主要途径是充分利用自然降水,减少地表径流,增加土壤水分^[36-37]。自然生草果园的初始入渗率、前30 min的入渗率和稳定入渗率均高于清耕果园,主要是自然生草果园的土壤孔隙度,特别是非毛管孔隙度较清耕有一定量的提高,有利于降水快速入渗;其次是清耕果园的土壤表层常受到雨滴的打击,地表易形成土壤结皮,不利于水分入渗,而自然生草的果园地面受杂草的保护,减弱了雨滴对地面的打击,有效减少了土壤结皮的形成,从而减少了土壤结皮对土壤水分入渗的影响^[36-37]。虽然双环法测定的土壤初始入渗率会受到入渗环砸入土壤过程中产生的土壤裂隙的影响^[38],但不同处理仍表现为自然生草年限越长,入渗率越高,这与土壤表层植物根系越多,越有利于水分入渗的结果相同^[21,35,39-41];同时也与自然生草年限越长,土壤结构越趋于合理密切相关。

试验园土壤为黑垆土,一般呈拟棱柱结构,疏松多孔,有垂直裂隙,渗水性强而蒸发作用弱,保水性能好^[23]。试验果园自然生草后土壤容重有一定量的降低趋势,土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度有一定量的增加趋势,有利于降水快速入渗,因而自然生草后土壤含水量提高。渭北旱塬限制苹果优质高产的首要因素是果园土壤水分不足,自然生草提高了果园土壤含水量,改善了果园土壤的通气性,为苹果根系生长提供了相对较好的土壤环境^[24]及小气候环境^[20],因而自然生草提高了果实产量及果实品质。

试验园每年施肥4次,每次均开挖40 cm深的施肥沟或施肥坑,每次施肥时均有一定量的杂草随施肥埋入0~40 cm土层,埋入的杂草含有丰富的有机碳、氮、磷、钾和钙等营养元素,易腐烂分解,可提高土壤有机质^[18],改善土壤结构,因而自然生草对0~40 cm土层影响较大,对40 cm以下土层影响较小。清耕果园一直施用化肥,施肥时无杂草带入土

壤,而自然生草可为土壤增加一定枯枝落叶^[18-19],因而自然生草年限越长,埋入土壤的杂草越多,对土壤的影响越大,苹果产量及品质越高。

4 结 论

渭北旱塬果园自然生草后,果园土壤容重有降低趋势,土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度有一定的增加趋势,而土壤含水量、田间持水量和饱和含水量则显著增加,土壤初始入渗速率、前30 min的土壤入渗速率和稳定入渗速率极显著增加,且对0~40 cm土层的影响强于40~60 cm土层,自然生草持续年限越长,对土壤的影响越大。渭北旱塬果园的苹果产量、果实着色面积、果实硬度、可溶性固形物含量和固酸比均随自然生草持续年限的延长而增加,但果实单果质量、果形指数和可滴定酸含量基本一致,不受自然生草年限的影响。自然生草可改善果园土壤的通透性,提高土壤蓄水保水能力,提高果实产量及品质,是改善渭北旱塬果园土壤立地环境,提高土壤蓄水保水的有效措施。

参考文献 References

- [1] 张维俊,李双异,徐英德,刘旭,安婷婷,朱平,彭畅,汪景宽. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 1-9
Zhang W J, Li S Y, Xu Y D, Liu X, An T T, Zhu P, Peng C, Wang J K. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil microenvironment and organic carbon turnover[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 1-9 (in Chinese)
- [2] 丁奠元,冯浩,赵英,杜社妮. 氮化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 650-658
Ding D Y, Feng H, Zhao Y, Du X. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 650-658 (in Chinese)
- [3] 李宗超,胡霞. 小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 242-248
Li Z C, Hu X. Effects of shrub (*Caragana microphylla* L.) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 242-248 (in Chinese)
- [4] 白岗栓,邹超煜,杜社妮. 渭北旱塬果园自然生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 151-158
Bai G S, Zou C Y, Du S N. Effects of self-sown grass on soil moisture and tree growth in apple orchard on Weibei dry plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(3): 151-158 (in Chinese)

- [5] 李会科, 张广军, 赵政阳, 李凯荣. 生草对黄土高原旱地苹果园土壤性状的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(2): 32-39
Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y, Li K R. Effects of interplanted herbage on soil properties of non-irrigated apple orchards in the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(2): 32-39 (in Chinese)
- [6] 刘富庭, 张林森, 李雪薇, 李丙智, 韩明玉, 谷洁, 王晓琳. 生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 355-363
Liu F T, Zhang L S, Li X W, Li B Z, Han M Y, Gu J, Wang X L. Effects of inter-row planting grasses on soil organic carbon fractions and soil microbial community of apple orchard in Weibei dryland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 355-363 (in Chinese)
- [7] 王艳廷, 冀晓昊, 张艳敏, 吴玉森, 安萌萌, 张芮, 王立霞, 张晶, 刘文, 李敏, 李文燕, 陈学森. 自然生草对黄河三角洲梨园土壤物理性状及微生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5374-5384
Wang Y T, Ji X H, Zhang Y M, Wu Y S, An M M, Zhang R, Wang L X, Zhang J, Liu W, Li M, Li W Y, Chen X S. Effects of self-sown grass on soil physical properties and microbial diversity of pear orchards in Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (16): 5374-5384 (in Chinese)
- [8] 曹铨, 沈禹颖, 王自奎, 张小明, 杨轩. 生草对果园土壤理化性状的影响研究进展[J]. 草业学报, 2016, 25(8): 180-188
Cao Q, Shen Y Y, Wang Z K, Zhang X M, Yang X. Effects of living mulch on soil physical and chemical properties in orchards: A review[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25 (8): 180-188 (in Chinese)
- [9] 付学琴, 刘璐珥, 黄文新. 南丰蜜橘园自然生草对土壤微生物和养分及果实品质的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(8): 1551-1558
Fu X Q, Liu J E, Huang W X. Effects of natural grass on soil microbiology, nutrient and fruit quality of Nanfeng tangerine yard[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(8): 1551-1558 (in Chinese)
- [10] 吴玉森, 张艳敏, 冀晓昊, 张芮, 刘大亮, 张宗营, 李文燕, 陈学森. 自然生草对黄河三角洲梨园土壤养分、酶活性及果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 99-108
Wu Y S, Zhang Y M, Ji X H, Zhang R, Liu D L, Zhang Z Y, Li W Y, Chen X S. Effects of natural grass on soil nutrient, enzyme activity and fruit quality of pear orchard in Yellow River Delta[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(1): 99-108 (in Chinese)
- [11] 陈学森, 张瑞洁, 王艳廷, 王楠, 姜生辉, 许海峰, 刘静轩, 王得云, 曲常志, 张艳敏, 姜远茂, 毛志泉. 苹果园种植长柔毛野豌豆结合自然生草对土壤综合肥力的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(12): 2325-2334
Chen X S, Zhang R J, Wang Y T, Wang N, Jiang S H, Xu H F, Liu J X, Wang D Y, Qu C Z, Zhang Y M, Jiang Y M, Mao Z Q. Effects of growing hairy vetch(*Vicia villosa*) on the soil nutrient, enzyme activities and microorganisms in apple orchard[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(12): 2325-2334 (in Chinese)
- [12] 潘学军, 张文娥, 樊卫国, 蓬桂华, 罗国华. 自然生草和间种绿肥对盆栽柑橘土壤养分、酶活性和微生物的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(8): 1235-1240
Pan X J, Zhang W E, Fan W G, Peng G H, Luo G H. Effects of sod culture and intercropping green manure on the soil nutrient, enzyme activities and microorganisms in bonsai Citrus[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(8): 1235-1240 (in Chinese)
- [13] 谷艳蓉, 张海伶, 胡艳红. 果园自然生草覆盖对土壤理化性状及大桃产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(12): 103-107
Gu Y R, Zhang H L, Hu Y H. Effect of natural grasses cover on soil properties and yield and quality of peach [J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(12): 103-107(in Chinese)
- [14] Du S N, Bai G S, Yu J. Soil properties and apricot growth under intercropping and mulching with erect milk vetch in the loess hilly-gully region[J]. *Plant and Soil*, 2015, 390(1/2): 431-442
- [15] 赵政阳, 李会科. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤水分的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(3): 481-484
Zhao Z Y, Li H K. The effects of interplant different herbage on soil water in apple orchards in the area of Weibei plateau [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(3): 481-484 (in Chinese)
- [16] 高茂盛, 廖允成, 李侠, 黄金辉. 不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2080-2087
Gao M S, Liao Y C, Li X, Huang J H. Effects of different mulching patterns on soil water-holding capacity of non-irrigated apple orchard in the Weibei plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(10): 2080-2087 (in Chinese)
- [17] 白岗栓, 郑锁林, 邹超煜, 杜社妮. 陇东旱塬果园生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 173-183
Bai G S, Zheng S L, Zou C Y, Du S N. Influence of interplant herbage patterns on soil moisture and apple tree growth in dry plateau of eastern Gansu[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26 (1): 173-183 (in Chinese)
- [18] 白岗栓, 周楠, 邵发琦, 杜建会, 郭江平. 自然生草对渭北旱塬苹果园土壤氮及果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 100-109
Bai G S, Zhou N, Shao F Q, Du J H, Guo J P. Effects of self-sown grass on soil nitrogen and apple fruit quality in the Weibei dry plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (10): 100-109 (in Chinese)
- [19] 王燕, 白岗栓. 自然生草对土壤和树体矿质营养及苹果树生

- 理病害的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(10): 2309-2322
- Wang Y, Bai G S. Effects of natural grass on mineral nutrition of soil and apple tree and physiological disease of apple tree [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(10): 2309-2322 (in Chinese)
- [20] 白岗栓, 郭江平, 杜建会. 自然生草对渭北旱塬苹果园小气候及果实灼伤和早期落叶病的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(2): 324-332
- Bai G S, Guo J P, Du J H. Effects of natural grass on microclimate of apple orchard, fruit sunburn and leaf early deciduous disease in Weibei dry plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2): 324-332 (in Chinese)
- [21] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 刺槐、柠条、沙棘林土壤入渗及抗冲性对比试验[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 90-95
- Hou X L, Bai G S, Cao Q Y. Contrast study on soil infiltration capacity and anti-scourability in *Robinia pseudoacacia*, *Caragana microphylla* and *Hippophae rhamnoides* woodlands [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(3): 90-95 (in Chinese)
- [22] 康强. 土壤入渗测定方法评述[J]. 乡村科技, 2014(8): 84-85
- Kang Q. Review of soil infiltration measurement methods [J]. *Rural Science and Technology*, 2014(8): 84-85 (in Chinese)
- [23] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992
- Soil Census Office of Shaanxi Province. *Soil of Shaanxi Province* [M]. Beijing: Science Press, 1992 (in Chinese)
- [24] 孙梅, 黄运湘, 孙楠, 徐明岗, 王伯仁, 张旭博. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 233-238
- Sun M, Huang Y X, Sun N, Xu M G, Wang B R, Zhang X B. Advance in soil pore and its influencing factors [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(1): 233-238 (in Chinese)
- [25] 刘涛, 王金满, 秦倩, 王洪丹, 白中科. 矿区机械压实对土壤孔隙特性影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 233-238
- Liu T, Wang J M, Qin Q, Wang H D, Bai Z K. Advance in the study on the effect of mechanical compaction on soil pore characteristics in mining area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 233-238 (in Chinese)
- [26] 杨彦明, 刘景辉, 李立军, 赵宝平, 车永强, 乌恩. 聚丙烯酰胺对土壤孔隙及含水特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 28-35
- Yang Y M, Liu J H, Li L J, Zhao B P, Che Y Q, Wu E. Effect of potassium polyacrylate on soil porosity and moisture characteristics [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(4): 28-35 (in Chinese)
- [27] 鞠忻倪, 贾玉华, 甘淼, 金珊, 肖波. 黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1098-1107
- Ju X N, Jia Y H, Gan M, Jin S, Xiao B. Characteristics of soil macropores in the gully area of Loess Plateau as affected by terrain [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1098-1107 (in Chinese)
- [28] 甘磊, 李健, 李帅, 韦灵, Saeed Rad. 广西甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 122-130
- Gan L, Li J, Li S, Wei L, Rad S. Soil pore characteristics of sugarcane field under different tillage treatments in Guangxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 122-130 (in Chinese)
- [29] 张保华, 陶宝先, 曹建荣, 刘子亭. 黄河下游冲积平原潮土土壤孔隙微形态特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 687-693
- Zhang B H, Tao B X, Cao J R, Liu Z T. Micromorphological characteristics of soil voids of fluvo-aquic soil in the alluvial plain of the lower Yellow River [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 687-693 (in Chinese)
- [30] 梁向锋, 赵世伟, 华娟, 张扬. 子午岭林区典型植被下土壤结构及稳定性指标分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 12-16, 22
- Liang X F, Zhao S W, Hua J, Zhang Y. Analysis of soil structure and its stability indexes under typical vegetation in Ziwouling forest area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(3): 12-16, 22 (in Chinese)
- [31] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 227-231
- Wang G L, Liu G B. Effect of *Stipa bungeana* communities on soil infiltration in soil profile in loess hilly region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 227-231 (in Chinese)
- [32] 高朝侠, 徐学选, 宇宙子, 张少妮, 赵传普. 黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1578-1584
- Gao Z X, Xu X X, Yu M Z, Zhang S N, Zhao C P. Impact of land use types on soil macropores in the loess region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1578-1584 (in Chinese)
- [33] 高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 赵传普, 张少妮. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2801-2811
- Gao Z X, Xu X X, Zhao J N, Zhao C P, Zhang S N. Review on macropore flow in soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 2801-2811 (in Chinese)
- [34] 刘霞, 姚孝友, 张光灿, 胡续礼, Heathman G C. 沂蒙山林区不同植物群落下土壤颗粒分形与孔隙结构特征[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 31-37
- Liu X, Yao X Y, Zhang G C, Hu X L, Heathman G C. Fractal features of soil particle size distribution and characteristics of soil pore space under different plant communities in forests of the Yimeng mountain [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(8): 31-37 (in Chinese)
- [35] 陈文媛, 张少妮, 华瑞, 徐学选. 黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 62-69
- Chen W Y, Zhang S N, Hua R, Xu X X. Effects of forestland

- and grassland restoration process on soil infiltration characteristics in loess hilly region[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 62-69 (in Chinese)
- [36] 赵鹏宇, 徐学选, 刘普灵, 陈天林, 廖鑫, 李波. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤入渗规律研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 40-44
Zhao P Y, Xu X X, Liu P L, Chen T L, Liao X, Li B. Infiltration characteristics under different land uses in the loess hilly area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(1): 40-44 (in Chinese)
- [37] 赵娇娜, 徐学选, 李星, 张良德, 宇苗子. 长武塬区降雨入渗特征[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(4): 37-44
Zhao J N, Xu X X, Li X, Zhang L D, Yu M Z. Characteristic of rainfall infiltration on Changwu Tableland[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(4): 37-44 (in Chinese)
- [38] 张婧, 雷廷武, 张光辉, 蔡崇法, 黄炎和, Yang Xiusheng. 环式入渗仪测量土壤初始入渗率效果试验[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 140-146
Zhang J, Lei T W, Zhang G H, Cai C F, Huang Y H, Yang X S. A new experimental method for observing initial soil infiltration under ring infiltrometer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 140-146 (in Chinese)
- [39] 冯璐, 丁康, 屈媛媛, Farhat Ullah KHAN, 杜峰, 徐学选. 黄土塬边坡植被类型对土壤孔隙的影响[J]. *草业科学*, 2020, 37(4): 625-634
Feng L, Ding K, Qu Y Y, Khan F U, Du F, Xu X X. The influence of Loess Tableland slope vegetation type on soil pore characteristics[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(4): 625-634 (in Chinese)
- [40] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 刘汗. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1040-1045
Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, Liu H. Soil infiltration capacity under different vegetations in southern Ningxia loess hilly region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1040-1045 (in Chinese)
- [41] 丁康, 徐学选, 陈文媛, Shahmir Ali Kalhoro. 长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(12): 44-51
Ding K, Xu X X, Chen W Y, Kalhoro S A. Soil aggregates and infiltration characteristics under different vegetations in Changwu tableland slope of northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(12): 44-51 (in Chinese)

责任编辑: 董金波